

# 基于贝叶斯网络模型的关键链项目进度管理

尤建新, 秦 云

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

**摘要:** 在工程项目工作分解(WBS)和贝叶斯网络技术的基础上, 考虑了 WBS 各单元之间的时序关系和资源约束条件, 结合实例建立了关键链项目管理贝叶斯网络模型(CCPMBN)。提出了相应的各项资源需用计划, 并通过蒙特卡洛仿真项目施工完成时间。结果表明关键链项目管理贝叶斯网络在项目进度延期的情况下能很好地识别影响工期的关键工序, CCPMBN 模型为控制施工建设进度与实现提供了重要参考。

**关键词:** 施工进度; 网络计划技术; 贝叶斯网络; 蒙特卡洛仿真

**中图分类号:** F294; C935

**文献标志码:** A

## Critical Chain, Project Schedule Management Based on Bayesian Network Model

YOU Jianxin, QIN Yun

(College of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A critical chain project management bias network model (CCPMBN) based on work breakdown structure (WBS) and Bayesian Network was established, which took full consideration into the temporal relations and resource constraints. The corresponding resources were proposed and the deadline of the construction was determined by Monte Carlo Model. The result shows that, with the method, the critical factors influencing the deadline can be well recognized. The proposed model provides an important reference for realizing of the construction schedule.

**Key words:** construction progress; network planning technique; Bayesian Network; Monte Carlo Simulation

因素多等诸多特点。在建设过程中由于业主要求的设计变更、工程要求提前交付、地质天气等原因使得工程项目在时间和资源条件的约束下完成项目目标越来越困难, 施工项目进度计划显得越来越重要。然而经典的 PERT/CPM 往往预先假定资源总能满足施工需求, 往往只是依据任务间的逻辑关系确定关键路线, 再来考虑资源优化等问题。事实上, 实际施工常常存在某些稀缺资源为关键线路和非关键路线上的任务共享, 使得一些原本依据工艺逻辑可以并行操作的任务不得不串行安排, 最终导致项目延期。所以需要对分解的 WBS 单元赋予一种紧前工序和紧后工序的关系, 同时考虑时间约束和资源约束, 这样就变成了对 WBS 单元进行关键链项目管理, 以便达到有效控制整个工程项目工期、成本的目的。

本文结合实际项目, 建立了基于工作分解结构的关键链贝叶斯网络模型(CCPMBN), 通过有效利用贝叶斯网络理论来识别风险工序, 借助蒙特卡洛仿真得出项目最可能工期, 从而帮助项目管理者准确进行进度风险管理。

## 1 关键链项目管理研究现状

传统的 PERT/CPM 网络图提供给管理者的信息不外乎包括项目总工期、各任务之间的逻辑关系和最早最迟时间及各种时差等。然而这些信息不足以应付现代项目管理对管理者提出的严峻挑战。成功的项目管理需要从全局去驾驭整个项目的实施, 而且要从微观层次上来加强管理, 如何选择合理的、客观真实的反映工程进度管理需要的关键性指标至关重要。于是 Goldratt<sup>[1]</sup> 博士提出将约束理论(Theory of Constraint, TOC)应用于项目管理上, 考虑任务间的紧前、紧后关系和资源冲突, 通过项目缓

随着科学技术的飞速发展和经济规模的日益扩大, 现代工程项目出现了投资大、工期长、不确定性

收稿日期: 2015-01-05

基金项目: 上海市重点学科建设项目(B310)

第一作者: 尤建新(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为管理理论与工业工程、科技发展与管理的。

Email: yjx2256@vip.sina.com

通讯作者: 秦 云(1990—), 男, 硕士生, 主要研究方向为物流与供应链管理。Email: qinyun0617@163.com

冲机制来消除项目中不确定因素对项目计划执行的影响,保证在确定环境下编制的项目计划在动态环境下的顺利执行,这便产生了更加符合实际应用的关键链项目管理(CCPM)。

Deac V 等<sup>[2]</sup>通过收集文献和实证研究比较传统的 PERT/CPM 和关键链的优缺点,认为关键链同时考虑紧前、紧后任务之间时间和资源约束,对于现代复杂的大型工程施工进度管理是更科学先进的方法;Jiang GP<sup>[3]</sup>在充分考虑到工程项目工期具有不确定性以及在项目实施过程中各项工序材料供应的情况下,研究了关键链缓冲区在项目进度风险管理中的应用,解决了工期不确定情况下的项目进度安排,对确定项目工期提出了指导性建议;Kamleshp<sup>[4]</sup>提出了一种基于模糊理论的关键链管理方法,利用模糊理论中的模糊语言来表示工序工期,然后通过函数转换变成相对应的梯形模糊数,在此基础上计算每道工序的最可能工期和安全时间,而以计算出来的安全时间为根据,可以相应的算出项目缓冲区和输入缓冲区的大小,为整体项目工期计算提供依据;马国丰<sup>[5]</sup>用遗传算法分析了项目群中一种资源以及多种资源的“多任务”关键链进度计划问题,使“多任务”现象转化成具有相应优先权的排序基因或染色体,对最优化进度和延迟成本构建了相应的算法,为关键路径法演变成关键链技术提供了定量支撑;叶跃祥<sup>[6]</sup>融合贝叶斯网络推理技术来求解不确定多属性决策问题,根据问题的决策变量、环境变量和多个属性之间的依赖关系构造贝叶斯网络,通过推理求解在各个方案下每个属性取值的概率分布,从而把问题转化成风险决策问题。

本文首先采用工作分解结构(WBS)对项目进行有效的任务分解,然后建立基于工作分解结构的关键链网络计划图来估计项目工期,并通过蒙特卡洛仿真得出项目最可能工期,最后建立了关键链贝叶斯网络图,从而指导施工建设进度管理。

## 2 关键链项目管理流程与缓冲时间设定

### 2.1 关键链项目管理流程

Goldratt 博士认为对于很多项目不能按计划顺利完成的主要原因在于关键工序,即关键工序称之为项目瓶颈,是制约系统发展的主要因素。关键工序存在于项目线路中耗时最长的那条,在资源一定的情况下必须把其首先供应给项目中起关键作用的工序,以提高项目进行中的质量和速度。所以关键链项

目管理的核心思想在于找出项目中的这些瓶颈,然后一一解决。具体工作流程如图 1 所示。

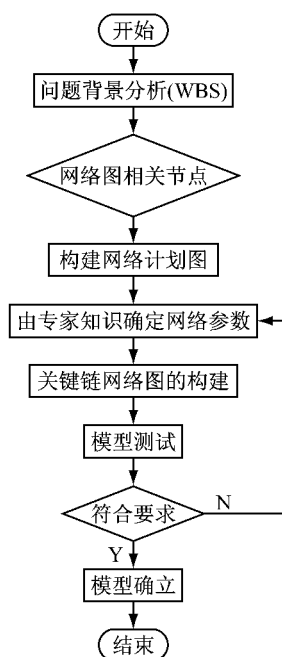


图 1 关键链项目管理流程

Fig.1 Critical chain project management process

由图 1 可知,关键链项目管理的核心思想是在不考虑资源约束的情况下,根据工序任务之间的紧前紧后关系建立网络计划图;然后从前、后两个方向确定计算出网络图的最早开始时间、最早完成时间、最迟开始时间和最迟完成时间等时间参数后找出关键线路;最后在考虑资源约束的情况下计算网络图的缓冲时间并加到项目网络图中,即构成关键链项目管理的全过程。由此可见,对于本文的研究方法来说,缓冲时间的确定是关键一环。

### 2.2 缓冲时间的计算

#### 2.2.1 缓冲技术介绍

相比 PETR/CPM,CCPM 的先进之处就在于它从全局出发,不仅考虑了项目时间的约束,更考虑了复杂环境下资源的约束,以此加入缓冲区来保证项目按时完成。CCPM 中的缓冲包括在非关键链汇入关键链的入口处,为将非关键链的不确定性影响同关键链隔离开来设置的入口缓冲(Feeding Buffer, FB);为吸收整个系统的不确定性,项目缓冲(Project Buffer, PB)是设置在关键链的最后一道工序之后的缓冲;此外,当需要投入某种资源来启动关键链上的工序,而其紧前关键工序又使用其他资源时,需要在该工序之前设置资源缓冲(Resource Buffer, RB),如图 2 所示。

图2A,B,C,D,E,F分别代表各施工工序,R代

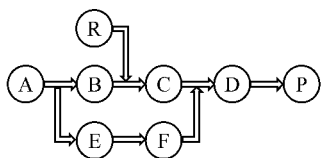


图 2 缓冲设置示例图

Fig.2 Buffer setting chart

表资源缓冲, P 代表项目缓冲。

如图 3 所示,对 CCPM 与 PERT/CPM 项目进度管理进行了比较。

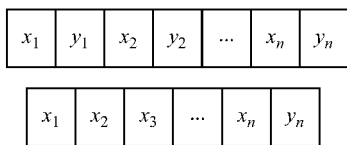


图 3 CPM 和 CCPM 缓冲设置对比图

Fig.3 Comparison of CPM and CCPM buffering

在图 3 中,  $x_i$  表示各工序最乐观的情况下的完成时间;  $y_i$  表示工期  $x_i$  额外的保证时间;  $Y$  表示项目总缓冲时间; 其中  $n$  为对应线路上的工序数。设  $\sigma_a^2$  与  $\sigma_b^2$  表示上图两种情况的方差, 有

$$\sigma_a^2 = \sum_{i=1}^n [(x_i + y_i) - x_i]^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2$$

$$\sigma_b^2 = [(\sum_{i=1}^n x_i + Y) - \sum_{i=1}^n x_i]^2 = Y^2$$

当  $\sigma_a^2 = \sigma_b^2$  时, 有

$$Y^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 \leq (\sum_{i=1}^n y_i)^2$$

$$Y \leq \sum_{i=1}^n y_i$$

可见, 当为链路设置各工序可共用的链路缓冲  $Y$  时, 在提供同等程度完工保证率的情况下, 其值小于各工序的安全缓冲  $y_i$  的总和。即设置缓冲可在没有增加总体完工风险的情况下, 大大缩短项目的计划工期。

### 2.2.2 缓冲区计算模型

根方差法认为工序安全缓冲  $\Delta t_i$  (Goldratt 认为  $\Delta t_i$  等于工序工期的一半) 代表了工序工期的不确定性, 文献<sup>[7]</sup>建议用  $\Delta t/2$  作为工序工期的, 并以 2 倍的链路标准差作为链路的缓冲估计。假定链路上工序工期相互独立, 则根据中心极限定理可得

$$\Delta B = 2 \left[ \sum_{i=1}^n (\Delta t_i/2)^2 \right]^{1/2} = \left[ \sum_{i=1}^n (\Delta t)^2 \right]^{1/2}$$

以上根方差计算缓冲区是基于工序的持续时间服从正态分布, 而实际项目进度由于受工期变更频繁、施工工序交叉复杂等因素影响, 工序的持续时间是服从偏态分布, 所以根方差法不适用于本文计算。因此, 结合文献<sup>[7-8]</sup>, 综合考虑资源紧张度、工序复杂度和管理者的风险偏好以及工序工期的偏正态分

布特性, 建立数学模型来计算项目关键链缓冲区的大小。

$$\Delta B = \left[ \sum_{i=1}^n [(1 + \alpha_i) \times \beta_i \times \delta_i \times \sigma]^2 \right]^{1/2}$$

$$\alpha_i = \max \left[ \left( \sum_{k=1}^m r_{kt} \right) / R_t \right]$$

式中  $m$  表示  $t$  时刻执行工序的总数;  $r_{kt}$  表示  $t$  时刻工序  $k$  所需的资源数;  $R_t$  表示  $t$  时刻的资源供应限量, 整个  $\alpha_i$  表示资源紧张量;  $\beta_i = N_p / N_T$ , 表示工序所在链路上工序的紧前关系数和链路上的工序总数;  $\beta_i$  表示工序的复杂度; 当链路包含的工序数较多时, 根据统计学原理整条链路近似服从正态分布, 实践中项目管理者可能选择不同的风险水平, 记风险偏好水平为  $\epsilon$ , 查标准正太分布表  $1 - \epsilon$  对应的标准差倍数  $f_{\epsilon}$ , 风险水平下的缓冲调整系数  $\delta_i = f_{\epsilon} / 2.0$ ;  $\sigma$  为工序持续时间的方差。

## 3 关键链项目管理的贝叶斯网络

### 3.1 相关参数的数学表达

1988 年 Pear<sup>[9]</sup>利用贝叶斯理论的先验后验概率结合网络计划图, 首次提出贝叶斯网络 (Bayesian Network, BN) 模型, 即为关键链项目贝叶斯网络 (CCPMBN)。其中,  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  表示网络中的所有节点集合,  $X_i = \{t(i), t_{ES}(i), t_{EF}(i), P_i^{K_i}, t_{LS}(i), t_{LF}(i)\}$ , 式中工序  $i$  的所需资源为  $P_i^{K_i}$ , 工序  $i$  的持续时间为  $t(i)$ , 最早开始时间为  $t_{ES}(i)$ , 最早完成时间为  $t_{EF}(i)$ , 最迟开始时间为  $t_{LS}(i)$ , 最迟完成时间为  $t_{LF}(i)$ 。

由于  $t_{LF}(i) = t_{LS}(i) + t(i)$ , 并且在关键链最后一个工序中  $t_{EF}(i) = t_{LF}(i)$ , 所以用  $t_{LS}(i)$  表示  $t_{LF}(i)$ 。工序的资源节点  $P_i^{K_i}$  是为了消除紧前紧后工序之间的冲突, 所以用  $P_i^{K_i}$  表示  $t_{EF}(i)$ , 且  $P_i^{K_i} = t_{ES}(i + 1) = t_{ES}(i) + t(i)$ 。所以由于 CCPM 中节点间的概率分布即可根据相互的数学关系可得,  $t_{ES}(i + 1)$  一般满足正态分布或者指数分布, 先验概率分布一般多为专家经验获得;  $P_i^{K_i}$  和  $t_{ES}(i + 1)$  的概率分布可以相互确定,  $P_i^{K_i}$  和  $t_{LF}(i)$  的概率由式  $P_i^{K_i} = t_{EF}(i) = t_{ES}(i) + t(i)$ ,  $t_{LS}(i) = t_{LF}(i) - t(i)$  和节点  $t_{ES}(i)$  的概率分布确定, 以此得到贝叶斯网络, 见图 4。

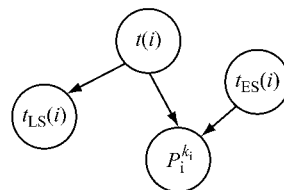


图 4 简化后的工序节点之间的关系

Fig.4 Simplified relationship of the activities

### 3.2 工作持续时间的确定

在确定型网络计划中,工作持续时间往往采用定额算法确定,计算如下:

$$D_{i-j} = \frac{Q_{i-j}}{S_{i-j} \cdot R_{i-j}}$$

$$M_{i-j} = \frac{Q_{i-j}}{C_{i-j}}$$

$$N_{i-j} = \frac{Q_{i-j}}{P_{i-j}}$$

式中: $D_{i-j}$ 为工作  $i-j$  的持续时间; $Q_{i-j}$ 为工作  $i-j$  的工程量; $R_{i-j}$ 为工作  $i-j$  的工人数或机械台班数; $S_{i-j}$ 为工作  $i-j$  的计划产量定额; $C_{i-j}$ 为工作  $i-j$  的人工产量定额; $P_{i-j}$ 为工作  $i-j$  的机械产量定额。

### 3.3 基于贝叶斯网络的风险工序的识别

建立关键链网络进度计划图的目的是为了识别风险工序,而通过建立计算比较贝叶斯网络各工序的先验、后验概率的差别来识别风险工序正是本文的研究重点.在关键链贝叶斯网络模型(CCPMBN)中,假设每个工序有 2 个完成状态:推迟完成=0;按时完成=1,则有

$$P(S_i = 0 | S_{i-1} = 0) =$$

$$\begin{cases} N(i)_{x>t(i)} \\ T \leq t_{ES}(i) - P_{i-1}^k \\ 1, \text{ 其他} \end{cases}$$

$$P(S_i = 0 | S_{i-1} = 0) = N(i)_{x>t(i)}$$

式中:工序  $(i-1)$  为工序  $i$  的一个紧前工序; $S_i$ ,  $S_{i-1}$  表示工序  $i$ ,  $i-1$  所处的完成状态; $T$  表示工序  $(i-1)$  推迟的时间; $N(i)_{x>t(i)}$  表示工序  $i$  服从的正太分布,其  $x>t(i)$ . 当项目没有按时后完成时,如果该项目的最后一个工序是  $T$ ,搜索并计算它的紧前工序  $S$  的后验概率,若计算得到  $S$  的后验概率与先验概率变化太大时表明  $S$  工序有风险工序的嫌疑,辨别是不是  $S$  影响了项目的进度.若不是,请继续检查  $S$  工序的紧前工序,以此类推.辨别风险工序的唯一标准就是先验概率和后验概率差距太大.下面通过案例来研究该方法适用性.

## 4 案例分析

某新城区公租房建筑群的 5 号公寓的建筑高度 37.8 m,共 12 层,建筑面积 13 014.6 m<sup>2</sup>. 该项目为框架—剪力墙结构,设计等级为一级,建筑设计使用年限为 50 年,高层建筑防火分类属于二类,建筑耐火等级为一级,抗震设防烈度为 7 度,抗震设防类别为丙类,基础为预应力混凝土管桩基础.该项目中标时间为 2013 年 3 月 6 日,总工期 300 d.

### (1) 安排施工顺序

为了充分利用施工作业面,满足时间的连续性,施工的均衡性、协调性、经济性,保证工期目标,依据现有的施工资源,土建施工、装饰装修、管件预埋和水电安装从时间和空间立体交叉施工,实行平面分段、立体分层、同步流水施工方法<sup>[10]</sup>,5 号楼为例,其施工顺序安排如图 5 所示.

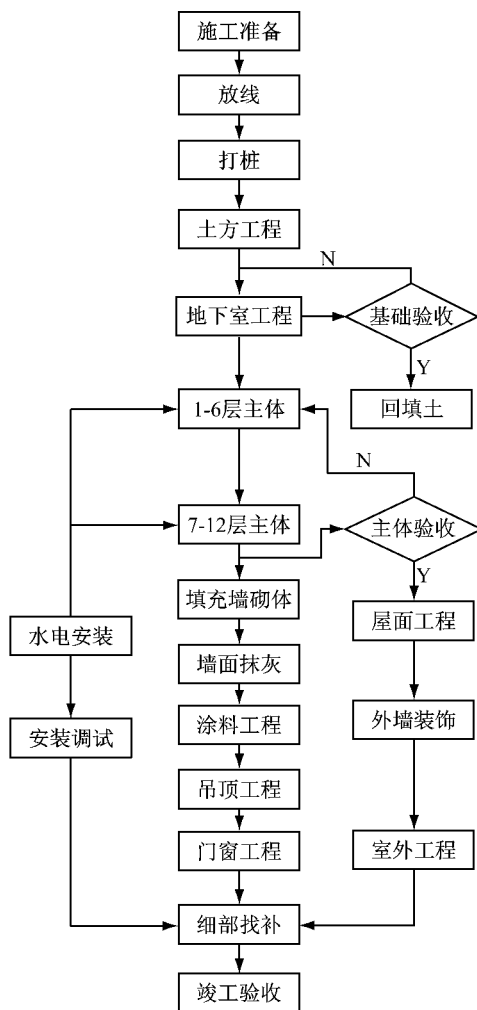


图 5 施工顺序安排流程

Fig.5 Construction sequence

根据制定的施工工艺流程,明确了各项工作的之间的逻辑关系,为了简化网络计划图的制定,表 1 给出了项目各工序时间参数.由于施工单位已有的施工机械 1 d 能完成 25 根桩,6 d 能完成 5 号楼所有打桩活动.土方工程中 1 d 能完成作业 3 000 m<sup>2</sup>,8 d 能完成 20 000 m<sup>2</sup>.在主体工程建设过程中,平均每天钢筋工 20 人,木工 25 人,瓦工 10 人,水电工 8 人,辅工 20 人,依据工程需要,流水施工,保证 8d 一层,具体工序持续时间计算如表 1,A~T 代表各工序.

### (3) 关键链网络图的构建

依据工作之间的逻辑关系绘制的项目施工网络

表 1 项目各工序时间参数  
Tab.1 The time parameters of project

代号	工序	紧前 工序	持续时 间/d	方差 /d	资源量 /人
A	施工准备		3	1	28
B	放线	A	0.5	0.5	25
C	打桩	B	6	1	45
D	土方工程	C	10	2	55
E	边坡支护	C	4	1	55
F	地下室工程	DE	15	5	63
G	1-6 层主体	F	48	5	63
H	7-12 层主体	G	48	5	63
I	屋面工程	G	10	2	63
J	1-12 层填充墙砌体	I	24	4	55
K	内墙抹灰	J	45	5	20
L	涂料工程	K	45	5	20
M	吊顶工程	L	24	6	28
N	门窗工程	M	24	6	20
O	细部工程	N	10	3	20
P	建筑地面工程	H	24	5	20
Q	室外工程	K	90	10	20
R	水电安装工程	D	250	10	28
S	细部找补	OPQR	3	1	20
T	竣工验收	S	1	1	0

计划图见图 6。

项目所包含的工序信息如表 1 所示,项目所能提供的劳动力最多为 83 人,项目计划按 95%保证率的风险偏好水平计算,所对应的标准差为 1.65。由网络参数计算可知,关键线路为 A,B,C,D,F,G,I,J,K,L,M,N,O,S,T。由网络图可知,关键线路工序 F 存在紧前工序 D 和 E,工序 S 存在紧前工序 O,P,Q,R。运用本文 2.2 中模型求解得各工序的  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  的值,见表 2。

于是根据公式算出项目缓冲 PB 为(关键链 A,

B,C,D,F,G,I,J,K,L,M,N,O,S,T):

$$PB = \left[ \sum_{i=1}^n [(1 + \alpha_i) \times \beta_i \times \delta_i \times \sigma]^2 \right]^{1/2} = 19.637$$

$$FB_1 = \left[ \sum_{i=1}^n [(1 + \alpha_i) \times \beta_i \times \delta_i \times \sigma]^2 \right]^{1/2} = 0.65$$

F 工序处存在非关键链 A,B,C,E 的接入  $FB_1$ , S 处存在 3 条非关键链的接入  $FB_2$ 、 $FB_3$  和  $FB_4$ ,同理计算得  $FB_2=11.580$ , $FB_3=18.000$ , $FB_4=5.996$ 。四舍五入得到  $PB \approx 20$ , $FB_1 \approx 1$ , $FB_2 \approx 12$ , $FB_3 \approx 18$ , $FB_4 \approx 6$ ,得到的关键网络图,如图 7 所示,计算得工期为 288.5 d。

(4) 基于蒙特卡洛仿真的项目工期预算

为了验证关键链所求的项目工期的准确性,本文基于蒙特卡罗仿真技术,Excel 中启用 Crystal Ball,将工序的估计持续时间设置为假设单元,项目最早结束时间即项目完成时间设为预测单元,置信度设置为 95%,重复试验 1 000 次运行得到下面图 8 所示的结果。

(5) 基于贝叶斯网络的风险工序的识别

由关键链网络图得出的项目工期是 288.5 d,由图 8 蒙特卡洛仿真运算得项目最可能的完工时间为 276 d,项目在 300 d 内完工的概率是 85.27%,项目要在 99%的下完成工期的为 333.42 d,由此推断定有风险关键工序影响工期进度。通过图 9 建立贝叶斯网络来识别风险工序。

由于项目所建的网络计划图的大部分工序都在关键链上,所以表 3 中当一个工序仅有一个紧前工序时,如果其延期,则其紧前工序一定延期,及其后验概率为 1。其中先验后验概率变化差距较大的即为风险工序。

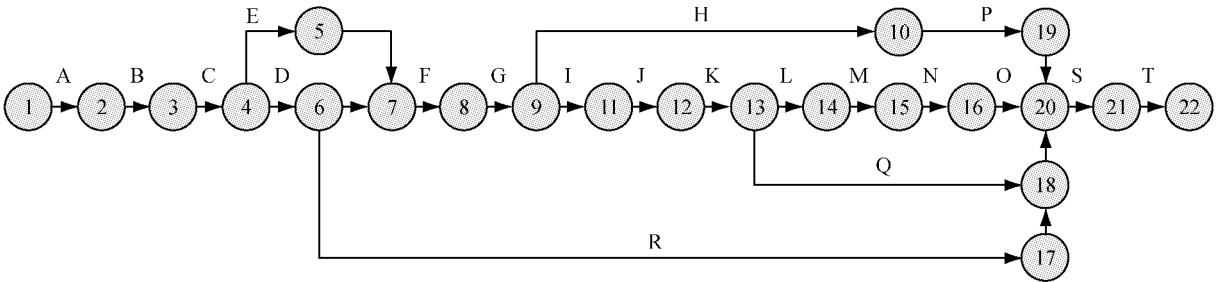


图 6 项目施工网络计划图  
Fig.6 Network planning of building 5

表 2 项目缓冲的各参数值  
Tab.2 The buffer parameters of every work

工序	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
$\alpha_i$	0.337	0.301	0.542	0.663	0.663	0.759	0.759	0.759	0.759	0.663
$\beta_i$	0.000	0.067	0.133	0.200	0.200	0.333	0.400	0.467	0.467	0.533
工序	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
$\alpha_i$	0.241	0.241	0.337	0.241	0.241	0.241	0.241	0.337	0.241	0.000
$\beta_i$	0.600	0.667	0.733	0.800	0.867	0.533	0.667	0.267	1.200	1.267

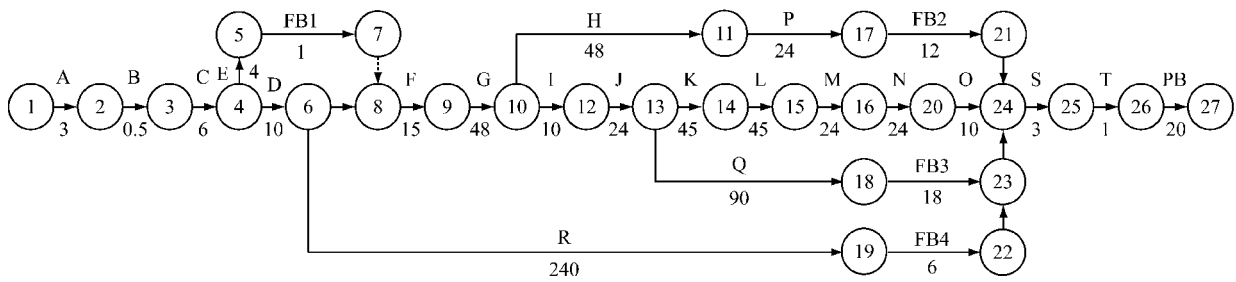


图 7 关键链网络图

Fig.7 The critical chain network diagram

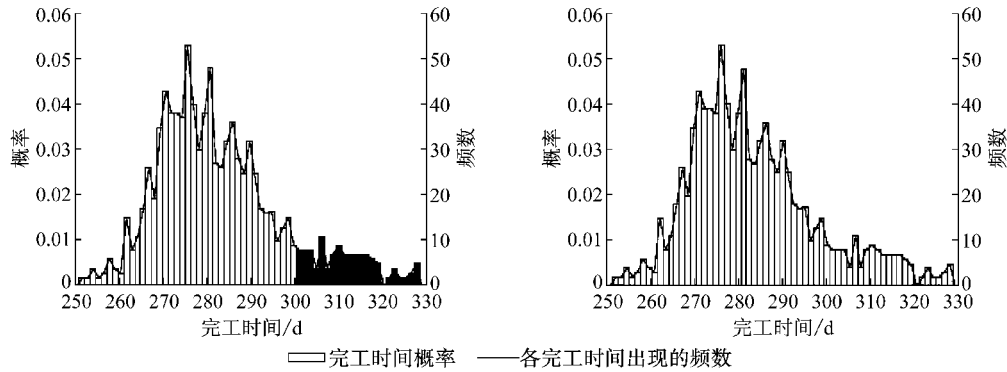


图 8 蒙特卡洛仿真图

Fig.8 Monte Carlo simulation

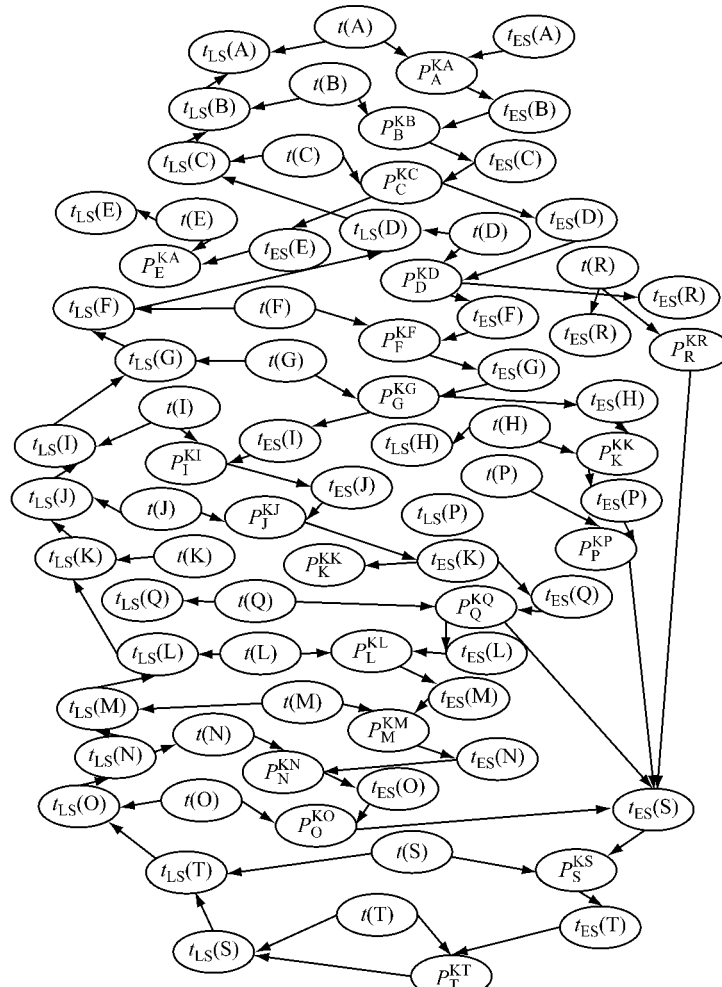


图 9 关键链贝叶斯网络图

Fig.9 CCPMBN

表 3 先验概率和后验概率

Tab.3 The prior probability and posterior probability

事件	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
先验概率	0.500	0.519	0.533	0.453	0.500	0.599	0.470	0.470	0.453	0.500
后验概率	1.00	1.00	1.00	1.00	0.525	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
事件	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
先验概率	0.559	0.559	0.500	0.500	0.614	0.530	0.604	0.604	0.500	0.547
后验概率	1.00	1.00	1.00	1.00	0.261	0.225	0.257	0.257	1.00	1.00

5 结语

本文研究运用关键链贝叶斯网络对项目的进度计划进行了组织安排. 对项目工程 WBS 情况下, 构建网络计划图并计算完工工期后插入缓冲时间绘制关键链网络计划图, 运用蒙特卡洛模拟项目完工的概率, 最后构建了关键链贝叶斯网络图以便利于查找风险工序, 为施工企业改进项目进度管理提供了理论和技术支持.

参考文献:

[1] Goldratt E M. Critical chain[M]. Great Barrington: North River Press, 1992.

[2] Deac Vasile, Vrincut M. The advantages of using critical project management in planning construction projects[J]. Meta-lurgia International, 2010, 15(5): 54.

[3] JIANG Guoping. Critical chain based on management of project scheduling risk [C] // Proceedings of the 5th-International Conference on Innovation& Management, VO-LS I and II. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008, 1428.

[4] Kamaleshp Anthi. Contingency estimation for analysis[J]. International Journal of Construction Education and Research, 2009, 5(2): 79.

[5] 马国丰, 尤建新. 关键链项目群进度管理的定量分析[J]. 系统

工程理论与实践, 2007, 7(9): 54.

MA Guofeng, YOU Jianxin. Quantitative analysis of critical chain multiple project scheduling management [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2007, 7(9): 54.

[6] 叶跃祥, 糜仲春. 基于贝叶斯网络的不确定环境下多属性决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2007(4): 107.

YE Yuexiang, MI Zhongchun. A Bayesian-networks-based method for multiple attributes decision making under uncertainly[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2007 (4): 107.

[7] 褚春超. 缓冲估计与关键链项目管理[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5): 1029.

CHU Chunchao. Buffer sizing and critical chain project management [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(5): 1029.

[8] 周正龙, 董雄报, 左园. 基于根方差法的 MIS 开发项目缓冲区研究[J]. 科技管理研究, 2014(8): 215.

ZHOU Zhenglong, DONG Xiongbao, ZUO Yuan. Study on the buffer of MIS development projects based on the root variance method[J]. Science and Technology Management Research, 2014(8): 215.

[9] Pear J. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible [M]. San Mateo: Morgan Kaufmann Press, 1988.

[10] 罗朝辉. 大型工程中多工种交叉施工管理协调的应用[J]. 广东科技, 2005(7): 64.

LUO Zhaohui. Construction coordination management of crossd construction in large engineering [J]. Guangdong Science & Technology, 2005(7): 64.